

University of Groningen

## The life cycle of radio galaxies as seen by LOFAR

Brienza, Marisa

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2018

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Brienza, M. (2018). *The life cycle of radio galaxies as seen by LOFAR*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. Rijksuniversiteit Groningen.

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.



# Sommario

## Contesto scientifico

---

Il nostro universo ospita miliardi di galassie, alcune delle quali (circa il 10-15%) brillano di una luminosità straordinaria. Queste galassie sono chiamate Nuclei Galattici Attivi (AGN) e sono tra i sistemi più potenti dell'Universo. Esse ospitano al loro centro un oggetto supermassivo con una massa compresa tra 10 milioni e 1 miliardo di volte quella del nostro Sole. Questo viene chiamato *buco nero* perché neanche la luce, la cui velocità non può essere superata, riesce a sfuggire alla sua immensa forza di attrazione gravitazionale. Quando gas, polvere interstellare o stelle raggiungono la prossimità del buco nero, vengono attratti da esso in un processo conosciuto come *accrescimento* e in questa fase il buco nero si considera attivo. Prima di venire completamente inghiottito dal buco nero, questo materiale viene accelerato e riscaldato, rilasciando così una enorme quantità di energia in tutte le bande dello spettro elettromagnetico, cento o mille volte superiore a quella prodotta dalle sole stelle, gas e polvere presenti in una tipica galassia.

Ad oggi, le osservazioni indicano che tutte le galassie più massive contengono un buco nero supermassivo nel loro centro e che questo sia attivo a fasi intermittenti in base alla disponibilità di materiale nelle sue vicinanze. I dettagli di questo ciclo di attività non sono però ancora completamente conosciuti.

Nonostante sia un fenomeno discontinuo, l'AGN gioca un ruolo cruciale nel plasmare l'evoluzione generale delle galassie del nostro universo. Infatti, data la sua energia, l'AGN è in grado di riscaldare, spostare e persino

rimuovere, dalla galassia che lo ospita, il gas a lui circostante. In particolare, si pensa che gli AGN siano la causa principale del forte decremento nella formazione di nuove stelle osservato nelle galassie ellittiche.

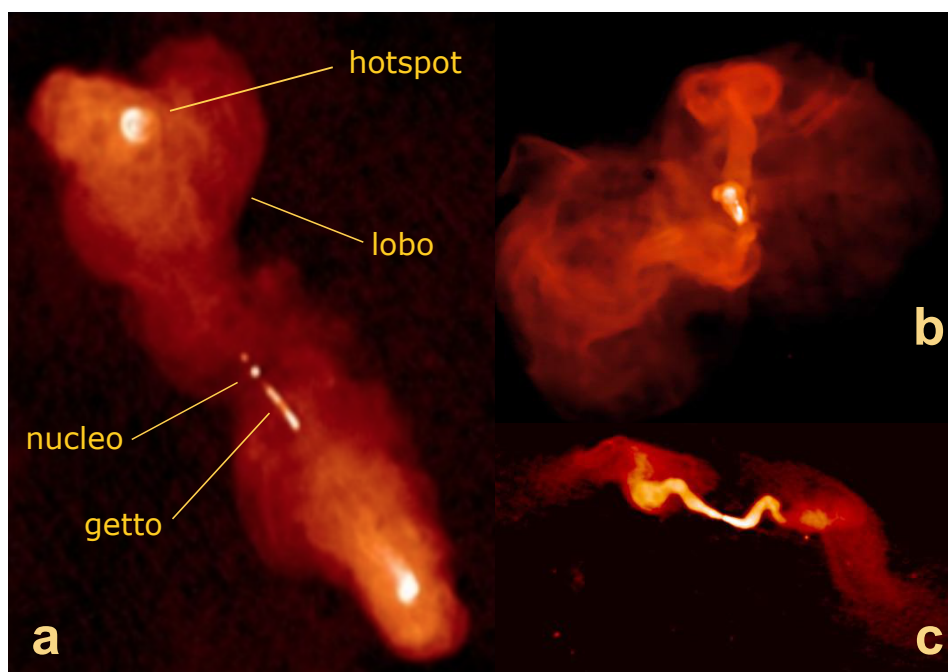
Nei decenni passati le numerose osservazioni di AGN a diverse frequenze hanno rivelato un'ampia gamma di caratteristiche e portato alla creazione di numerose classificazioni. Ad oggi, molte delle differenze osservate tra un oggetto e l'altro sono state ricondotte ad un diverso orientamento dell'AGN rispetto all'osservatore. Tuttavia, esistono alcune differenze intrinseche alla struttura fisica dei diversi AGN. La più significativa tra queste è la capacità di accelerare il gas circostante a tal punto da espellerlo sotto forma di getti simmetrici di particelle relativistiche (che si muovono cioè con velocità prossime a quella della luce) sotto l'influenza di forti campi magnetici (vedi Figura 1). Queste sorgenti sono chiamate *AGN con getti* o *radiogalassie*, poiché emettono gran parte della loro energia a frequenze radio, e rappresentano l'oggetto principale di questa tesi. La radiazione emanata dai getti viene prodotta da particelle elettricamente cariche che si muovono a velocità relativistiche in un campo magnetico e viene chiamata *radiazione di sincrotrone*.



**Figura 1** - Rappresentazione artistica di un AGN che mostra il buco nero al centro della galassia che attrae a sé il materiale circostante e produce un getto di particelle che si espande verso l'esterno. Credits: NASA/JPL-Caltech.

Come ogni cosa in natura, le radiogalassie si trasformano nel tempo e a questa evoluzione ci si riferisce come ‘ciclo di vita di una radiogalassia’ (*life cycle of a radio galaxy* in inglese).

Inizialmente, i getti hanno dimensioni pari a poche migliaia di anni luce e sono completamente contenuti nella galassia. In seguito i getti riescono ad espandersi oltre la galassia stessa e possono raggiungere dimensioni fino ad alcuni milioni di anni luce. Durante l’espansione, le particelle che costituiscono i getti interagiscono con il materiale circostante formando delle caratteristiche strutture a forma di lobo chiamate appunto *radio lobi*. Inoltre, quando i getti più potenti impattano contro il materiale esterno si creano forti shock, che danno origine a regioni brillanti alle estremità dei lobi, chiamate hot-spot. Alcuni esempi di radiogalassie osservate con il telescopio Very Large Array, nel Nuovo Messico (USA), sono presentate in Figura 2.



**Figura 2** - Immagini radio di tre famose radiogalassie (a, 3C193; b, 3C274; c, 3C31) con diversa morfologia realizzate usando dati ottenuti con il telescopio Very Large Array, in Nuovo Messico (USA), alla frequenza di 1.4 GHz. Nel pannello a vengono indicate le principali componenti di una radiogalassia. Credits: NRAO/AUI.



Dopo un periodo che dura da poche decine a qualche centinaia di milioni di anni, l'attività del buco nero cessa e i getti si spengono. Durante questa fase i radio lobi si espandono nel mezzo intergalattico e si affievoliscono, soprattutto ad alte frequenze. Le radiogalassie che si trovano in questa fase sono destinate a svanire e vengono chiamate *relitti* o *residui* di AGN (*relic* o *remnant* AGN in inglese) e sono oggetto di studio di questa tesi. In alcuni casi, dopo un periodo di quiescenza, il buco nero riprende la sua attività e i getti si riattivano dando vita alle cosiddette radiogalassie *ripartite* (*restarted radio galaxies* in inglese), anch'esse argomento di particolare interesse per questa tesi. In questi oggetti è possibile osservare simultaneamente l'emissione dei nuovi getti e quella dei vecchi radio lobi prodotti dai precedenti getti.

Come già discusso, i getti hanno un impatto significativo sull'evoluzione della galassia che li ospita e per questo è essenziale capire i dettagli del loro ciclo di vita, quantificare la durata della loro attività e l'origine della loro intermittenza.

## **Il Low Frequency Array (LOFAR)**

---

Agli albori della radioastronomia, negli anni '30, la maggior parte delle osservazioni veniva effettuata a frequenze radio molto basse (sotto qualche centinaio di MHz). Nei decenni successivi invece, gran parte dello sviluppo tecnologico si concentrò sulla creazione di telescopi sensibili alle frequenze intorno e superiori ad 1 GHz, che permettevano di rilevare anche gli oggetti più deboli e compatti.

Tuttavia dall'inizio degli anni '90 l'interesse verso le osservazioni a frequenze inferiori ad 1 GHz si è riaperto. Questo ha dato una nuova spinta alla ricerca informatica e tecnologica portando alla realizzazione di telescopi di nuova generazione in cui il tradizionale concetto di antenna parabolica viene abbandonato a favore di antenne a dipolo omnidirezionali. Tra questi ci sono i telescopi Long Wavelength Array (LWA) nel Nuovo Messico, il Low Frequency Array (LOFAR) nei Paesi Bassi e il Murchison Widefield Array (MWA) in Australia, che sono ad oggi considerati i precursori del rivoluzionario telescopio, chiamato Square Kilometer Array (SKA), che verrà realizzato nel prossimo decennio in Australia e Sudafrica.

Questa tesi è basata su dati raccolti con il telescopio LOFAR. Esso è costituito da dipoli raggruppati in un totale di 38 stazioni nei Paesi Bassi di cui 24 centrali situate all'interno di un raggio di 2 km, il cosiddetto

‘nucleo’, e 14 disposte secondo una distribuzione a spirale che si estende per un raggio di  $\sim 90$  km, chiamate ‘remote’. Ci sono inoltre 12 stazioni internazionali operative distribuite in sei diversi paesi europei (Germania, Regno Unito, Francia, Svezia, Polonia e Irlanda). Questa distribuzione di antenne consente di ottenere risoluzioni spaziali molto elevate, ossia riuscire a distinguere oggetti molto piccoli in cielo, e allo stesso tempo di osservare oggetti molto estesi.

A differenza delle classiche parabole, le antenne LOFAR non sono mobili e non devono essere puntate nella direzione di cielo che si vuole osservare. Grazie alla loro struttura infatti ricevono simultaneamente la radiazione dall’intero cielo. Solo a posteriori il segnale proveniente dalla regione di cielo di interesse viene selezionato e combinato a quello ricevuto dalle altre antenne prima di essere analizzato. Questa tecnica conferisce al telescopio un’estrema flessibilità in termini di puntamento e consente osservazioni simultanee di diverse regioni del cielo. In compenso il flusso di dati durante ogni osservazione è incredibilmente alto, pari a  $\sim 1.7$  TB/s e la quantità totale di dati archiviati fino ad oggi è 25 PB (terza solo alla capacità degli archivi dei dati di Google e Facebook).

Con l’avvento di LOFAR ha preso vita una grande varietà di progetti scientifici che spaziano dalla cosmologia al sistema solare. Di particolare interesse per questa tesi è la realizzazione della LOFAR Low Frequency Survey (LoTSS), una campagna osservativa che è tuttora in corso con l’obiettivo di creare mappe dell’intero cielo boreale a 150 MHz.

## Questa tesi

---

Questa tesi nasce con l’intento di sfruttare le capacità all’avanguardia di LOFAR per migliorare le nostre conoscenze sul ciclo di vita delle radiogalassie. In particolare si concentra sullo studio dei relitti di radiogalassie e delle radiogalassie ripartite, descritte nella sezione precedente. Le domande principali che ci hanno guidato in questo progetto sono le seguenti: quali sono le proprietà principali delle radiogalassie residue e ripartite, e come possiamo selezionarle in modo completo e sistematico in vaste regioni di cielo? Come e quanto velocemente evolvono le radiogalassie quando i getti si spengono? Con che frequenza i getti si riattivano nelle radiogalassie?

In questo campo di ricerca ci sono diverse caratteristiche che rendono LOFAR uno strumento unico. In primo luogo, con LOFAR è possibile osservare il cielo a bassa frequenza ( $< 200$  MHz) e rilevare anche le

sorgenti più deboli. Questo è un requisito fondamentale per lo studio delle ultime fasi di evoluzione delle radiogalassie. Infatti, dopo lo spegnimento dei getti, la luminosità delle sorgenti diminuisce in particolare ad alta frequenza. In secondo luogo, la distribuzione delle stazioni LOFAR rende il telescopio sensibile sia a sorgenti estese che compatte. Questo consente una caratterizzazione morfologica delle radiogalassie a basse frequenze senza precedenti. Infine, l'ampio campo di vista delle antenne LOFAR ci consente di osservare vaste porzioni di cielo e realizzare ricerche sistematiche di oggetti rari, come le radiogalassie residue e riavviate.

Se combinati con dati raccolti con altri telescopi, i dati LOFAR consentono di condurre studi spettrali, ossia studiare la luminosità delle radiogalassie al variare della frequenza. Da questa analisi è possibile ricavare ulteriori informazioni. In particolare, visto che la luminosità delle radiogalassie varia con tempi diversi alle diverse frequenze, è possibile ricostruire l'età di queste sorgenti studiando la loro luminosità a più frequenze contemporaneamente. Per questo motivo, durante gli ultimi quattro anni abbiamo raccolto dati complementari a frequenze superiori a 150 MHz usando una varietà di radiotelescopi come il Very Large Array nel Nuovo Messico, il Westerbork Synthesis Radio Telescope nei Paesi Bassi, il Sardinia Radio Telescope in Italia, l'Effelsberg 100-m Radio Telescope in Germania e il Giant Metrewave Radio Telescope in India (Figura 3).

In questa tesi abbiamo analizzato nei dettagli le proprietà di un relitto di radiogalassia scoperto con LOFAR (chiamato 'Blob1', Capitolo 2) e due radiogalassie ripartite note in letteratura (B2 0258+35, Capitolo 4 e 3C388, Capitolo 5). Abbiamo inoltre condotto delle nuove ricerche di AGN la cui attività si è fermata o ripartita. Nel Capitolo 3 presentiamo la selezione di un campione di relitti di radiogalassie nella famosa regione di cielo chiamata Lockman Hole. Nel Capitolo 6 abbiamo investigato la presenza di emissione vecchia associata ad un campione di radiogalassie giovani e compatte nella versione più recente della survey LoTSS. Infine, abbiamo sviluppato delle simulazioni Monte Carlo per creare dei campioni teorici di radiogalassie e predire la frazione di relitti di radiogalassie attesi nelle osservazioni reali (Capitolo 3).

Di seguito riportiamo le principali conclusioni di questa tesi.

- La maggior parte dei relitti di radiogalassie studiati in letteratura mostra indici spettrali molto ripidi (luminosità ad alta frequenza molto più basse di quelle a bassa frequenza), tipici di particelle che



**Figura 3** - I telescopi usati in questa tesi. *Alto-sinistra* - Very Large Array, Nuovo Messico (CREDITS: Michael A. Stecker); *alto-destra* - Sardinia Radio Telescope, Italia (CREDITS: Media-INAF); *centro-sinistra* - Stazione svedese del Low Frequency Array, Svezia (CREDITS: Onsala Space Observatory); *centro-destra* - Westerbork Synthesis Radio Telescope, Paesi Bassi (CREDITS: Richard Dawkins); *basso-sinistra* Giant Metrewave Radio Telescope, India (CREDITS: NCRA-TIFR); *basso-destra* Effelsberg 100-m Radio Telescope, Germania (CREDITS: MPIfR).

stanno invecchiando. Le osservazioni e le simulazioni presentate in questa tesi (Capitoli 2 e 3) dimostrano però che questo non vale per tutti i relitti di radiogalassie ma solo per i relitti più evoluti.

- Tipicamente i relitti di radiogalassie non mostrano emissione radio in corrispondenza del nucleo della galassia perché si pensa che in questa fase il buco nero sia completamente inattivo. In realtà nel

reliitto di radiogalassia studiato nel capitolo 2 abbiamo rilevato una debole attività nucleare, dai valori molto più bassi di una classica galassia attiva. Questo potrebbe essere una indicazione del fatto che in alcune circostanze l'attività del buco nero non cessi completamente ma diminuisca solo drasticamente.

- I nostri studi confermano che l'indice spettrale ripido può essere utilizzato come principale metodo per identificare relitti di radiogalassie solo se si hanno dati a frequenze maggiori di 5 GHz (Capitoli 2 e 3). In caso contrario è essenziale utilizzare criteri diversi basati sulla morfologia e sulla prominenza della emissione radio nucleare per identificare relitti di radiogalassie in tutte le fasi evolutive.
- Considerando che le particelle più vecchie emettono la maggior parte della radiazione a frequenze basse, si è a lungo creduto che osservazioni a 150 MHz sarebbero state cruciali per identificare un maggior numero di relitti e di radiogalassie ripartite. Tuttavia, in questa tesi abbiamo mostrato che il numero dei relitti di radiogalassie rimane basso (<15% rispetto al numero complessivo di radiogalassie nel cielo) anche a 150 MHz e includendo vari criteri di selezione nella ricerca (Capitolo 3). Lo stesso risultato è stato ottenuto considerando i relitti associati a radiogalassie giovani attive (Capitolo 6). Questo è anche confermato dalle simulazioni e ci indica che la luminosità di queste sorgenti evolve molto più velocemente di quanto atteso, probabilmente a causa della loro veloce espansione nell'ambiente circostante.
- Nella maggior parte delle radiogalassie il ciclo di attività dei getti è più lento rispetto al tempo necessario ai relitti per scomparire. Un'interessante eccezione a questo risultato è rappresentata dalla radiogalassia B2 0258+35 presentata nel Capitolo 4. In questo caso è possibile osservare sia i getti nuovi che i relitti delle attività precedenti. Ciò suggerisce che in questa galassia i getti vengano riattivati con una maggiore frequenza, probabilmente a causa della grande quantità di gas che circonda il buco nero.

Questa tesi ha posto le basi per espandere in modo sistematico la ricerca, e quindi lo studio, delle radiogalassie residue e riavviate a bassa frequenza. Il prosieguo di questo lavoro consisterà nel caratterizzare ulteriormente le radiogalassie residue selezionate nel Capitolo 3. Di queste studieremo le

caratteristiche delle rispettive galassie ospite come la distanza, la massa e le proprietà spettrali ottiche usando osservazioni in altre bande dello spettro elettromagnetico. Inoltre, utilizzando la campagna osservativa LOFAR LoTSS, da poco disponibile, estenderemo la ricerca di questa classe di oggetti ad aree di cielo più grandi. Includeremo inoltre nella ricerca anche le radiogalassie riavviate, con l'obiettivo di caratterizzarne meglio il ciclo di attività tipico delle radio galassie.

